

粘塑性有限要素法による液状化時の 深層混合改良地盤の挙動解析

小宮一仁¹・赤木寛一²・玉野亮人³・○高橋正光⁴

¹工博 千葉工業大学助教授 工学部土木工学科(〒275-8588 千葉県習志野市津田沼 2-17-1)

²工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科(〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

³ケミカルグラウト株式会社 施工本部設計部(〒107-0051 東京都港区元赤坂 1-1-5 富士陰ビル)

⁴ケミカルグラウト株式会社 施工本部設計部(〒107-0051 東京都港区元赤坂 1-1-5 富士陰ビル)

In this study, the effectiveness of deep mixing method to prevent the liquefaction due to the earthquake are investigated by the finite element method analyses. To simulate the collapse of ground liquefacted, the visco-plastic flow analyzing technique is integrated into the elasto-plastic dynamic FEM analysis. The proposed modelling technique is applied to simulate vibrating laboratory tests and the numerical results are compared with the lab-tests' measurements.

Key Words : deep mixing method, liquefaction, finite element method, earthquake, sandy soil

1. まえがき

近年、深層混合処理工法が液状化防止対策として注目され、兵庫県南部地震においても深層混合処理工法地盤改良の有効な液状化防止効果が報告されている。深層混合処理工法が液状化防止に有効である要因として、改良杭を造成することにより地盤の密度が増加すること、また改良杭が地盤を拘束するために地盤のせん断抵抗が増加すること等が考えられる。

本研究では、土～水連成弾塑性動的過渡応答有限要素法解析に液状化による地盤崩壊挙動をシミュレーションする粘塑性有限要素法解析を組み合わせた解析法を用いて、深層混合処理された地盤の液状化解析を行う。併せて解析結果と室内模型実験結果との比較を行い、深層混合処理工法の液状化防止効果について基礎的な考察を行う。

2. 深層混合処理の液状化防止効果に関する室内模型実験

深層混合処理工法の液状化防止効果が実際の地盤で確認されているとはいえ、実際の地盤を対象とした解析を第一に行うことは、土質特性や地震加速度等が詳細に計測されていることが極めて希であるなどの理由により解析パラメータの決定等に多くの困難を有する。そこで本研究では、深層混合処理工法の液状化防止効果に関する室内模型実験の解析を行い、深層混合処理の改良密度と液状化発生加速度について比較を行う。以下に本研究で解析対象とする室内模型実験¹⁾の概要を示す。

図-1は実験装置の概略である。鋼製の土槽(縦95cm×横130cm×高さ100cm)に模型砂地盤(相対密度 D_r =約40%)を水中落下法により深さ80cmになるよう作製した。試料は千葉県君津市小糸産の洗い砂(土粒子の密度 2.719g/cm^3)を使用した。模型砂地盤を作製する際、改良杭による拘束圧の影響を検討するため、改良杭とみなした塩化ビニール製の簡易孔内水平載荷試験装置($\phi 8.9\text{cm} \times 69\text{cm}$: 2本、 $\phi 8.9\text{cm} \times 65\text{cm}$: 1本)を計3本埋設した。埋

設にあたっては、模型砂地盤にボーリング孔を掘ると孔壁に乱れが生じるため、模型地盤作製中に埋設した。簡易孔内水平載荷試験の概略も図1に同時に示す。模型砂地盤作製後、改良杭造成前の模型砂地盤の拘束圧を測定するため孔内水平載荷試験を行った。測定深度は模型砂地盤の表面から20cm, 40cm, 60cmの地点である。その後、模型砂地盤に深層改良杭を千鳥型に造成した(図-2参照)。改良杭の直径は約10cmで、造成深さは40cmの場合と55cmの場合の2通りとした。改良密度の違いによる液状化防止効果や地盤拘束性能の変化を調べるため、それぞれの造成深さに対し、改良杭の本数を23本、30本、35本の3通りとした。深層混合処理を施した後48時間以上改良杭を養生し、再び孔内水平載荷試験を行った後に土槽全体を振動させ、過剰間隙水圧比をもとに液状化の有無を調べた。以上に示した実験方法で、振動加速度を変えた実験を行い、深層混合の処理密度と液状化発生加速度の関係および地盤の拘束性能の変化を調べた。

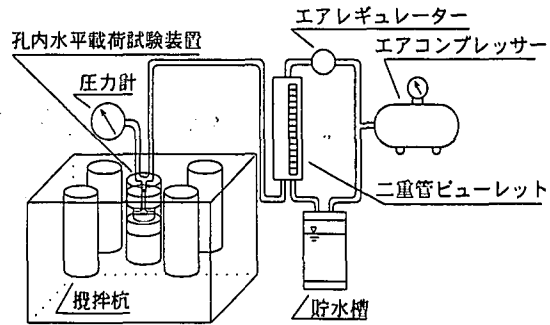


図-1 実験装置の概略

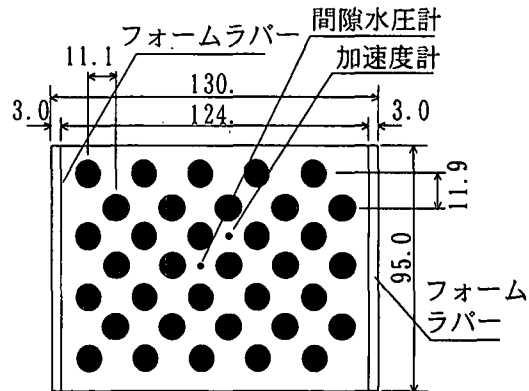


図-2 地盤改良例

図-3は実験で得られた深層混合の処理密度と液状化発生加速度の関係を示したものである。深層混合処理密度は、模型地盤の体積に対する改良杭体積の百分率(体積置換率)である。図から、改良杭の深さが55cmの場合には、体積置換率12%以上になると液状化発生加速度が上昇し、液状化防止効果が大きくなった。図-4は、体積置換率と孔内水平載荷試験で得られた地盤の変形係数を示したものである。図-3、図-4の両図から、液状化防止効果が大きくなる体積置換率と地盤の変形係数が大きくなる体積置換率がともに12%と一致していることがわかる。このことから、深層混合処理に伴う液状化防止効果は、改良杭が地盤を拘束することによって発揮されると考えられる。

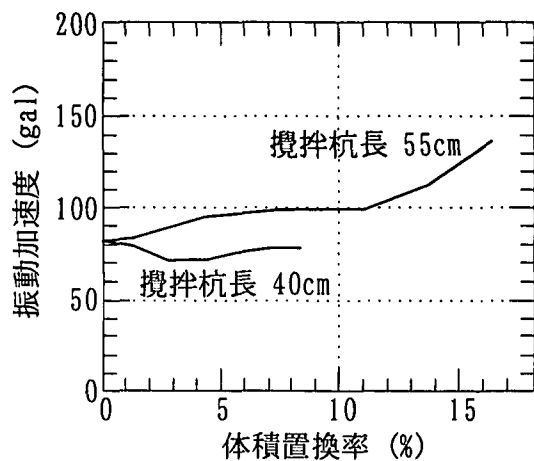


図-3 体積置換率と液状化発生加速度の関係

3. 解析の概要

本研究の有限要素法解析は、土～水連成弾塑性動的過渡応答有限要素法解析と粘塑性流動有限要素法解析を組み合わせたものである。解析フローは次のとおりである。まず、土～水連成陽的弾塑性動的過渡応答有限要素法解析によって各要素の有効応力を計算する。本解析では、砂地盤盛土の崩壊を計算するために、構成則には Mohr-Coulomb の破壊規準を用いる。要素の

有効応力状態が Mohr-Coulomb の破壊規準に達しないうちは、土粒子骨格には土～水連成弾塑性変形が生じるとして各節点の変位を計算する。一般的な弾塑性解析では、要素の応力状態が Mohr-Coulomb の破壊規準に達した場合は、この破壊規準を降伏曲面として弾塑性節点変位を計算する。しかしながら、本解析では要素の応力状態が Mohr-Coulomb の破壊規準に達した時点で地盤は破壊したとし、破壊後の地盤の変位挙

動を決定する手段として粘塑性流動有限要素法解析を用いた。粘塑性流動有限要素法解析では、まず破壊規準に達した時点の全応力を一時的な超過応力と見なし、超過応力から得られた要素のストレッチングを Hohenemser と Prager²⁾によって提案された次式の一般化 Bingham 流動則で計算した。

$$2\eta v_{ij} = \begin{cases} 0 & (F < 0) \\ F \cdot S_{ij} & (F \geq 0) \end{cases} \quad (1)$$

ここに、 η は塑性粘度、 v_{ij} はストレッチング、 S_{ij} は偏差応力テンソル、 τ_y は降伏規準（ここでは Mohr-Coulomb の破壊基準値を用いる）、 J_2 は偏差応力テンソルの第2不変量、 F は次式で表される降伏関数である。

$$F = 1 - \frac{\tau_y}{\sqrt{J_2}} \quad (2)$$

次に(1)式で求まる要素のストレッチングに弾性剛性マトリクスを乗じて計算される応力を生じさせるのに必要な節点力を積分により逆算し、この節点力を用いて弾性計算を行って要素の変形を決定した。粘塑性変形時は要素の体積ひずみが変化しないので、粘塑性解析における要素の過剰間隙水圧は、1ステップの粘塑性変形終了時における要素の応力と等価な節点力によって静的非排水土～水連成解析を実施して計算した。粘塑性変形後要素の有効応力状態が Mohr-Coulomb の破壊規準下になれば再び動的変形解析に移行する。

4. 実験結果と解析結果の比較

未だ3次元解析プログラムの動作確認等が完了していないため、本研究では2. に示した実験土槽の加振方向の縦断面のうち改良杭中央を通過する面を想定した平面ひずみ状態の解析を行った。したがって、実験における改良杭の千鳥組効果は解析では考慮されていない。

図-5 は解析モデルの一例（深さ 55cm 改良、体積置換率 20%）を示したものである。この他に、体積置換率を 10% のものと改良杭を設置しないモデル（計 3 モデル）について解析を行った。また表-1 に示す数字は解析に用いたパラメータである。粘塑性解析パラメータは文献³⁾をもとに決定した。この解析モデル縦断面水平方向に実験と同じ 4.0Hz の正弦波を 10 秒間作用

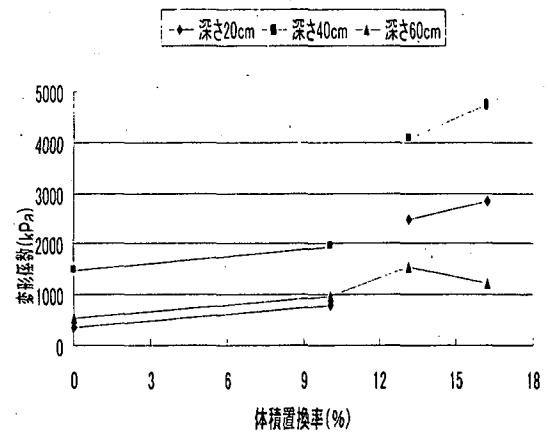


図-4 体積置換率と変形係数の関係

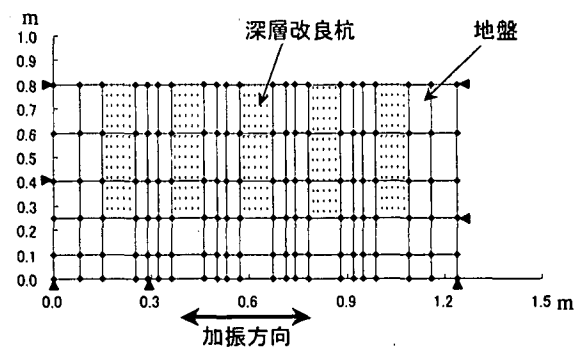


図-5 解析モデル（55cm-20%改良）

表-1 入力パラメータ

(弾塑性計算)

弾性係数 E	10000.0kPa
ポアソン比 ν	0.380
地盤の密度 ρ	1.50 g/cm ³
摩擦角 ϕ	30
粘着力 c	1.00 kPa
透水係数 k	0.0

(粘塑性計算)

弾性係数 E	10000.0 kPa
ポアソン比 ν	0.490
粘性係数 μ	1650.0 kP · s
降伏値 τ	Mohr-Coulomb

させた。

図-6 は、液状化防止効果として、全地盤要素の体積に対する粘塑性計算に移行した地盤要素の体積の割合 R (% : 最大値) と最大振動加速度の関係を示したものである。図から、改良杭の体積置換率が上がると粘塑性計算に移行する要素体積は少なくなる傾向が見られる。粘塑性計算に移行する要素が少なければ液状化した地盤の部分が少ないことになるので、この解析結果

は定性的には実験結果と一致していると考えられる。しかしながら、この解析結果からは、室内実験のようにはっきりとした定量的な改良率と液状化防止効果の関係を評価することはできない。これは、平面ひずみモデルでは改良杭の千鳥組効果が考慮できない点、あるいは今回の解析では改良杭施工に伴う地盤の剛性の変化を考慮しなかった点等の解析方法自体の問題点によることもあるが、液状化防止効果を定量的・合理的に評価する基準値が解析では定まらないことにもよる。また、実験結果で改良杭下端よりも深い地盤においても拘束力が高くなっていることからわかるように、改良杭施工時の地盤の密度増加等も液状化防止効果に大きく関係していると考えられる。これらは、平面ひずみ解析の限界を示すとともに、施工の影響を解析に盛り込むことの重要性を示していると考えられる。

5. まとめ

本研究は、土～水連成弾塑性動的過渡応答解析有限要素法プログラムに粘塑性有限要素法プログラムを組み込むことによって、深層混合処理工法を施工した模型実験の解析を行い、深層混合処理地盤改良の液状化防止効果について基礎的な考察を行ったものである。

解析では、改良杭の体積置換率が上がると粘塑性計算に移行する要素体積は少なくなる傾向が見られ、深層地盤改良の密度を大きくとれば液状化防止効果が上がるという実験で得られたものと定性的には同じ結果が得られた。しかしながら、液状化防止効果を定量的に評価するためには、今後3次元解析の導入、施工過程の考慮等が必要であることが明らかになった。

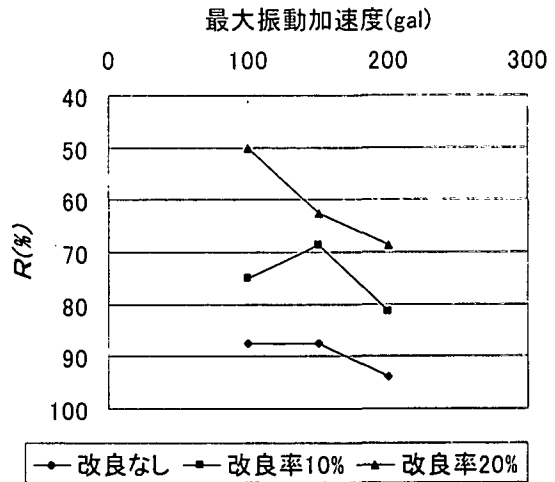


図-6 最大振動加速度と粘塑性計算に移行した要素体積Rの関係

参考文献

- 1) 小宮一仁, 清水英治, 渡邊勉: 深層混合処理の液状化防止効果, 第1回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, 土木学会, p.245-248, 2000
- 2) Fung, Y.C. 著, 大橋義夫ら訳: 連続体の力学入門, 培風館, p.225-227, 1974
- 3) Akagi, H., Komiya, K.: Earth pressure applied to tunnel due to the settlement of soft clay, 沿岸域の開発における地盤工学的諸問題に関する国際会議論文集, Vol.1, p.153-158, 1991